

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование коррозионной стойкости и физико-механических свойств поверхности циркониевого сплава Э110 с покрытием TiN

УДК 669.296:669.295:544.653.2/.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Чжун Дахуа		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Никитенков Николай Николаевич	д.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Кашкаров Егор Борисович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	к.х.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н., доцент		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОС3+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
Р2	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
Р3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОС3+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
Р4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОС3+(ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)

P5	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОС3+(ОПК-8, ОПК-9)
Профессиональные компетенции		
P6	Научно-исследовательская деятельность Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОС3+(ПК-1, ПК-2)
P7	Научно-инновационная деятельность Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОС3+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
P8	Организационно-управленческая Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОС3+(ПК-6, ПК-7, ПК-8)
P9	Педагогически-просветительская Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОС3+(ПК-9)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Лидер А.М.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
150Б51	Чжун Дахуа

Тема работы:

Исследование коррозионной стойкости и физико-механических свойств поверхности циркониевого сплава Э110 с покрытием TiN	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в</i>	Циркониевый сплав Э110, установка для насыщения водородом, установка для нанесения покрытия.

<p>плана безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>		
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>		<p>Перечень подлежащих разработке вопросов:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Литературный обзор по теме исследования. 2. Подготовка образцов для исследования. 3. Анализ физико-механических свойств осажденного покрытия. 4. Анализ коррозионной стойкости образцов с покрытием.
<p>Перечень графического материала</p> <p>(с точным указанием обязательных чертежей)</p>		
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p>(с указанием разделов)</p>		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В.Ю.	
Социальная ответственность	Скачкова Л.А.	
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>		
<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>		

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Никитенков Николай Николаевич	д.ф.-м.н.		
Ассистент	Кашкаров Егор Борисович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Чжун Дахуа		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
150Б51		Чжун Дахуа	
Институт	Инженерная школа ядерных технологий	Кафедра	Отделение Экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02. Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Альтернативы проведения НИ
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Чжун Дахуа		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
150Б51	Чжун Дахуа

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Физика

Тема ВКР:

Исследование коррозионной стойкости и физико-механических свойств поверхности циркониевого сплава Э110 с покрытием TiN	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект: циркониевые сплавы Э110; Прибор: XRD-7000, сканирующий электронный микроскоп, Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 и NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X; Область применения: оболочки тепловыделяющих элементов в активной зоне ядерного реактора
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) 2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. 3. ГОСТ Р ИСО 9241-2-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 2. Требования к производственному заданию. 4. ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 4. Требования к клавиатуре. 5. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.

	6. ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDTs). Часть 1. Общее введение. 7. ГОСТ Р ИСО 9241-7-2007. Эргономические требования при выполнении офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 7. Требования к дисплеям при наличии отражений. 8. ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Шум. 2. Электробезопасность. 3. Радиационная безопасность. 4. Микроклимат.
3. Экологическая безопасность:	Область воздействия на окружающую среду: в воздухе рабочей зоны
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения: 1) Электрическое напряжение. 2) Пожаровзрывоопасность. 3) Сосуды, находящиеся под высоким давлением. Наиболее типичную ЧС: пожаровзрывоопасность

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Скачкова Лариса Александров	к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Чжун Дахуа		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Уровень образования бакалавриат

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2018	Аналитический обзор литературы	15
01.09.2018	Подготовка образцов циркониевого сплава Э110	15
30.12.2018	Проведение исследований борбции водородом сплава с покрытиями и их стойкости при высоких температурах окисления	20
30.04.2019	Анализ результатов	15
25.05.2019	Социальная ответственность	15
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2019	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер А.М.	д.т.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 75 с., 26 рисунков, 18 таблиц, 24 источника.

Ключевые слова: циркониевый сплав Э110, покрытие TiN, коррозионная стойкость, физико-механические свойства

Объектом исследования является циркониевый сплав Э110 с покрытием TiN.

Цель работы – исследование влияния осаждения покрытия TiN на физико-механические свойства и коррозионную стойкость циркониевого сплава Э110.

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию коррозионной стойкости циркониевого сплава с покрытием TiN, осажденным методом магнетронного распыления. В процессе исследования проводились измерения сорбции водорода образцами циркониевого сплава с покрытием при температуре 350 °С и 900 °С. Кроме того, проводились коррозионные испытания при окислении образцов на воздухе при температуре 1100 °С. Кристаллическая структура образцов изучалась методом рентгеноструктурного анализа. Механические свойства покрытий измерялись методом наноиндентирования. В результате исследований установлено, что покрытие TiN демонстрирует защитные свойства от поглощения водорода циркониевым сплавом и значительно повышает физико-механические свойства поверхности образцов.

Степень внедрения: результаты работы представлены на международной научной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук».

Область применения: результаты исследования могут быть использованы для разработки покрытий на основе нитрида титана для оболочек тепловыделяющих элементов.

Оглавление

РЕФЕРАТ.....	10
Введение.....	15
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	17
1.1 Фазовая диаграмма системы Zr-Nb	17
1.2 Коррозия циркониевого сплава.....	18
1.3 Водородное охрупчивание циркониевого сплава	20
1.3.1 Водородное охрупчивание.....	20
1.3.2 Влияние водорода на ползучесть циркониевых сплавов	22
1.4 Покрытия для защиты циркониевых сплавов.....	23
1.4.1 Коррозионная стойкость циркониевого сплава с покрытиями TiN, TiAlN	25
1.4.2 Механические свойства нитрида титана	26
ГЛАВА 2. Приборы и методы исследования	29
2.1. Пробоподготовка	29
2.2 Термический отжиг образцов	29
2.3 Магнетронное напыление TiN.....	30
2.4 Рентгеновский дифрактометр «XRD-7000».....	31
2.5 Насыщение водородом из газовой среды.....	33
2.6 Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий	35
2.7 Определение механических характеристик покрытий	36
ГЛАВА 3 Результаты и обсуждения	37

3.1 Результаты микроскопии покрытий	37
3.2 Твердость и модуль Юнга покрытий	38
3.3 Сорбция водорода сплавом Э110 с покрытиями TiN	40
3.4 Адгезионная прочность покрытий до и после наводороживания	42
3.5 Рентгеноструктурный анализ образцов до и после насыщения водородом	43
3.6 Термоциклирование образцов при температурах 900 °С	45
3.7 Наводороживание образцов при температурах 900 °С	46
3.8 Трибологические испытания покрытий	47
3.9 Оксидирование образцов при температурах 1100 °С	49
ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	50
4.1 Организация и планирование работ	50
4.1.1 Продолжительность этапов работ	51
4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	56
4.2.1 Расчет затрат на материалы	56
4.2.2 Расчет заработной платы	57
4.2.3 Расчет затрат на социальный налог	57
4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	58
4.2.5 Расчет амортизационных расходов	59
4.2.6 Расчет прочих расходов	60
4.2.7 Общие затраты на исследование	60

4.3 Оценка экономической эффективности исследования.....	60
ГЛАВА 5. Социальная ответственность	62
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. ...	62
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	62
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.	63
5.2 Профессиональная социальная безопасность.....	63
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.....	63
5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.	64
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	64
5.3 Экологическая безопасность.	66
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.....	66
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду. ..	67
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.	67
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.	67
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.	67

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.	67
5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.	71
Заключение.....	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	73

Введение

С беспрецедентным ростом глобального спроса на энергию ядерная энергетика считается надежной, доступной и устойчивой альтернативой ископаемым видам топлива. Циркониевые сплавы, такие как Э110, Э125, Э635 и др. получили широкое применение в ядерной энергетике за счет низкого сечения поглощения тепловых нейтронов, совместимости с диоксидом урана, хорошей коррозионной стойкости в условиях высокой температуры и воды под высоким давлением, достаточной прочностью при высоких температурах и хорошей обрабатываемостью. Циркониевые сплавы используются в качестве материала оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ).

Хотя циркониевые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в условиях высокой температуры и воды под давлением, существуют проблемы водородного охрупчивания и коррозии при заэксплуатационных температурах. В случае аварии с потерей теплоносителя (LOCA) на атомных электростанциях оболочки ТВЭЛОВ из циркониевого сплава могут окисляться в водяном паре при высоких температурах (выше 500 °C), что, в свою очередь, сопровождается выделением большого количества водорода [1]. Водород оказывает негативное влияние как на механические свойства сплава (потеря пластичности), так и на коррозионную стойкость. Таким образом, проблема коррозии сплава при аварийных условиях реактора и водородного охрупчивания циркониевых сплавов является актуальной, особенно ввиду сложившейся аварийной ситуации на АЭС Фукусима-1.

Для решения проблемы коррозии и водородного охрупчивания циркониевого сплава, разрабатывается несколько методов. Например, оптимизация состава сплава и осаждение на его поверхность тонкопленочного покрытия [2].

Осаждение защитной плёнки на поверхность циркония может привести к снижению скорости поглощения водорода, а также повысить стойкость сплава в условиях высокотемпературного окисления. В данной работе были исследованы механические свойства и коррозионная стойкость сплава Э110 с покрытием нитрида титана (TiN).

Цель работы: установить влияние осаждения покрытия TiN на физико-механические свойства и коррозионную стойкость сплава Э110.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Литературный обзор по теме исследования.
2. Подготовка образцов для исследования.
3. Анализ физико-механических свойств осажденного покрытия.
4. Анализ коррозионной стойкости образцов с покрытием.

ГЛАВА 1. Литературный обзор

1.1 Фазовая диаграмма системы Zr-Nb

На рисунке 1 представлена фазовая диаграмма состояния системы Zr-Nb. Nb является бета-стабилизатором, который образует полный объемный твердый раствор от чистого β -Zr до чистого Nb при повышенных температурах. При закалке из верхних зон β и $\alpha + \beta$, богатые ниобием β -фазовые зерна трансформируются в пересыщенную гексагональную фазу мартенситным превращением. Мартенситное превращение является одним из диффузионных преобразований, в котором превращение представляет собой фазовое изменение, которое происходит без дальнедействующей диффузии атомов, а скорее в виде формы кооперативного, однородного движения многих атомов, что приводит к изменению кристаллической структуры. Последующая термическая обработка ниже объемной температуры приводит к осаждению β' -Nb на двойных границах α -иглообразных зерен. Кроме того, метастабильная ω -фаза может быть получена путем медленного охлаждения. Существует простая ориентационная эпитаксиальная связь между ω -фазой и исходной β -фазой [3].

Из рисунка 1 видно, что в отсутствии Nb, кристаллическая структура Zr представляет собой α -фазу с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) кристаллической решеткой. При температуре 863 °C, α -фаза Zr переходит в β фазу с объемно-центрированной (ОЦК) кристаллической решеткой. При добавлении Nb температура $\alpha \rightarrow \beta$ превращения снижается до 620 °C. При

температурах от 900 °С до 1800 °С состояние сплавов Zr-Nb является $\beta\text{Zr}+\text{Nb}$.

Сплав Zr-Nb становится жидким при температурах выше 1900 °С.

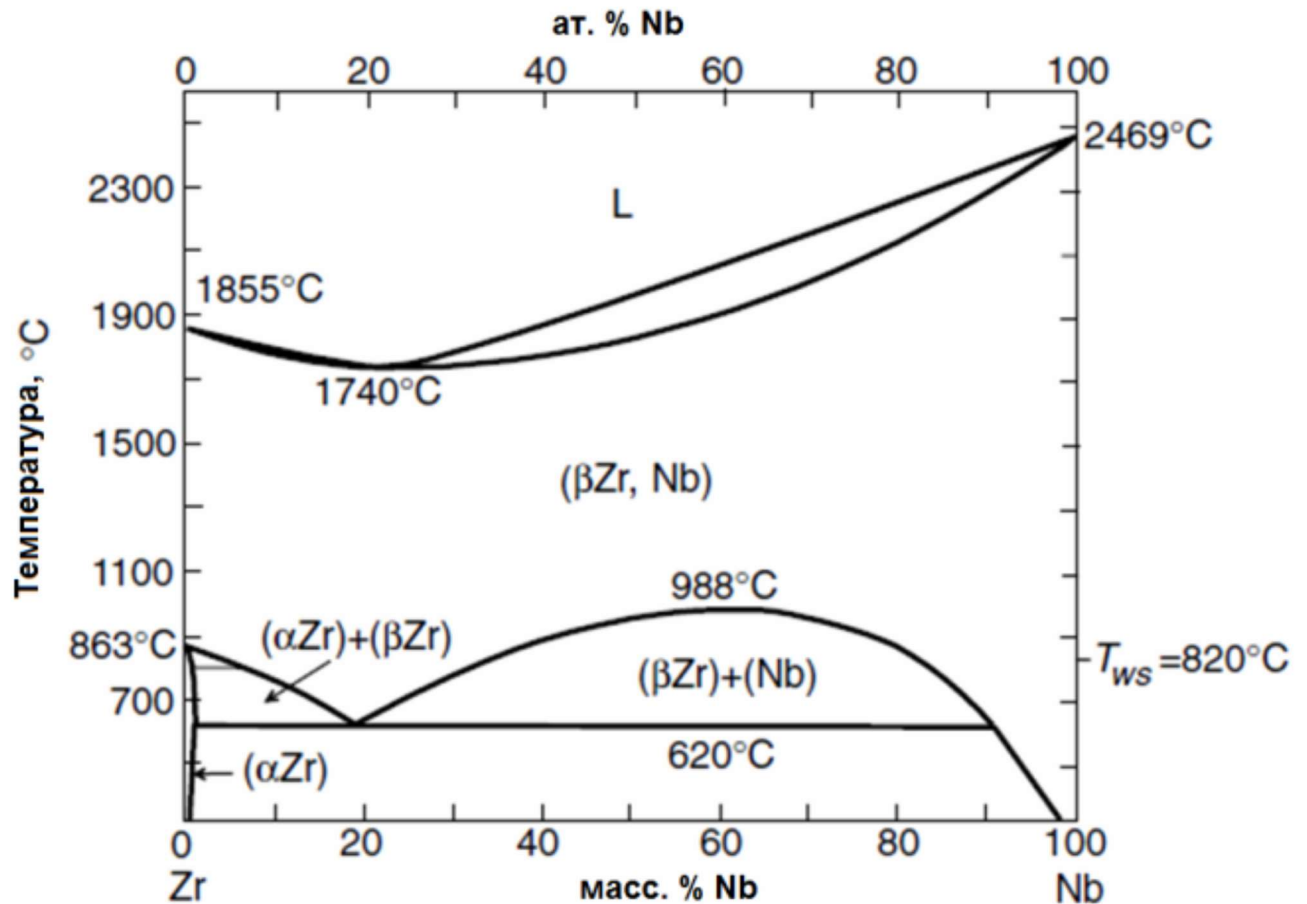
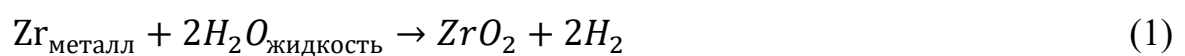


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма баланса системы Zr-Nb [4].

1.2 Коррозия циркониевого сплава

Сплав Zr-Nb чувствителен к присутствию кислорода в среде и проявляет выраженную коррозию:



Кинетика этой реакции окисления хорошо описывается степенным законом, соответствующим уравнению [5]:

$$W = At^n \quad (2)$$

где W – привес, t – время реакции, A – постоянная, и n является показателем, который для автоклавной коррозии при 360°C в воде обычно варьируется от 0,2 до 0,5 в зависимости от сплава.

Чем выше температура, тем быстрее протекает коррозия. Из анализа рисунка 1.2, можно сделать вывод, что микротвердость сильно зависит от концентрации кислорода.

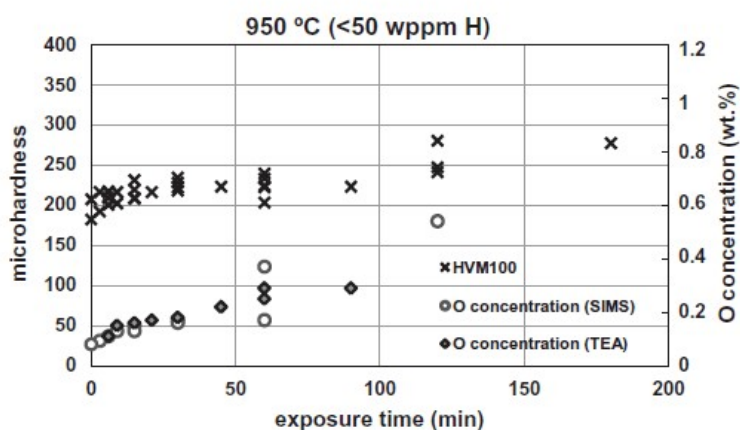


Рисунок 1.2 – Результаты измерений SIMS и микротвердости полученного образца, подвергнутые воздействию пара при температуре 950°C в зависимости от времени экспозиции [5].

1.3 Водородное охрупчивание циркониевого сплава

1.3.1 Водородное охрупчивание

В ядерных реакторах процесс попадания водорода в материал оболочки твэлов неизбежен. Реакция водородного охрупчивания циркония:



Факторы, влияющие на количество поглощенного водорода представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Факторы, влияющие на количество поглощенного водорода

Материал	Различные циркониевые сплавы обладают различными свойствами поглощения водорода.
Температура	Чем выше температура, тем больше поглощается водород.
Расход охлаждающей жидкости	Чем быстрее скорость потока, тем ниже поглощение водорода.
Облучение	Облучение увеличивает скорость поглощения водорода.
Содержание водорода в воде	Водород, растворенный в воде, уменьшает тенденцию вновь образованных атомов водорода рекомбинировать в молекулярный водород и отделяться от оксидной пленки. Водород, растворенный в воде, также обеспечит новый источник атомарного водорода: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$. При рабочей температуре водород диффундирует быстрее, чем кислород через оксидную пленку. Поэтому в случае

	<p>достаточного количества атомарного водорода одна анионная вакансия может многократно переносить водород до тех пор, пока вакансии не будут рекомбинированы с кислородом. Общий эффект заключается в том, что наводороживание Zr в воде, содержащей водород, будет выше. Подобно действию водорода, другие примесные восстановители (такие как D₂, СО и т.д.) также увеличивают поглощение водорода.</p>
<p>Кислород в воде</p>	<p>Растворенный кислород в воде снижает поглощение водорода. Потому что $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$. Существуют три ситуации: 1) молекулярные ионы кислорода и водорода конкурируют за электроны, 2) ионы кислорода и атомный водород, конкурируют за вакансии, 3) ионы кислорода могут также реагировать с ионами водорода, чтобы генерировать молекулы воды. Подобно кислороду, другие примесные окислители также снижают поглощение водорода.</p>

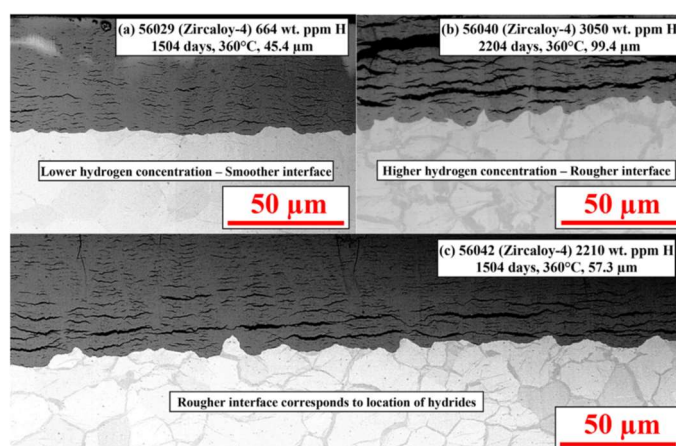


Рисунок 1.3 – Сравнение микрофотографий СЭМ трех образцов Zircaloy-4, корродированных при 360 °С с различными концентрациями водорода [5].

На рисунке 1.3 показано, что чем выше концентрация водорода, тем более неравномерна ростет оксид на границе раздела металл/оксид, что связано с выделением гидридов в металле.

1.3.2 Влияние водорода на ползучесть циркониевых сплавов

Kishore [6], Oh и другие [7] провели одноосные испытания на ползучесть при растяжении наводороженных образцов, разрезанных в продольном и поперечном направлениях из трубки сплава Zr-2,5% Nb, чтобы исследовать влияние водорода и ориентации на поведение ползучести сплава. Kishore [6] использовал наводороженные образцы с концентрацией водорода 65 ppm и 160 ppm, испытания на ползучесть проводились при температуре 450 °C для напряжения в диапазоне 25-150 МПа. Поскольку концентрация водорода меньше, чем предел растворимости при температуре испытаний, водород присутствовал в форме твердого раствора во время испытаний на ползучесть. Скорость ползучести, как в поперечном, так и в продольном направлениях увеличилась примерно в два раза при концентрации водорода 160 ppm. Вариации показателя напряженности с содержанием водорода как для продольной, так и для поперечной ориентации представлены на рисунке 8. Для исходного образца значение напряжений 2,8 в продольном направлении указывает на то, что механизм ползучести контролируется скольжением дислокаций, тогда как значение 1,86 в поперечном направлении указывает на то, что механизм ближе к проскальзыванию границ зерен. В случае образцов с концентрацией водорода

160 ppm показатель уменьшается до значений 2,41 и 1,59 для продольного и поперечного направлений, что соответственно указывает на изменение механизма деформации.

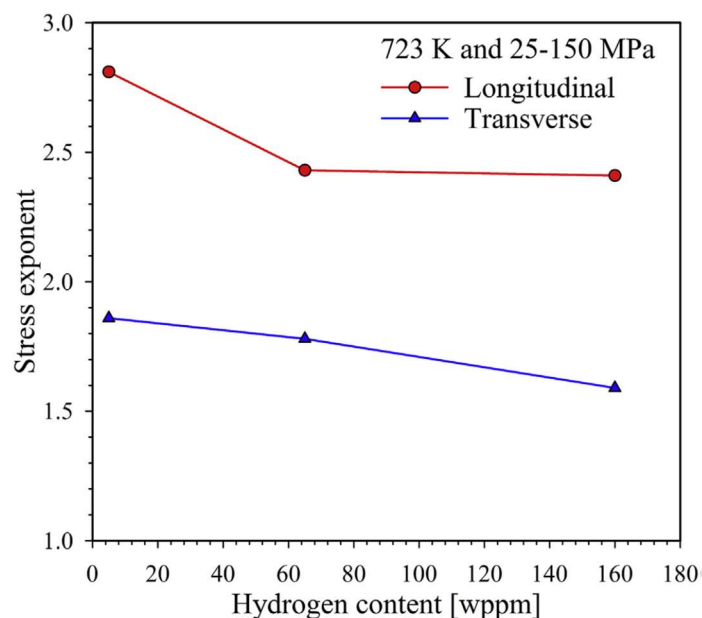


Рисунок 1.4 – Изменение показателя напряжений в Zr-2,5% Nb для продольной и поперечной ориентации с содержанием водорода [8].

1.4 Покрyтия для защиты циркониевых сплавов

Сплавы на основе циркония используются в ядерных энергетических реакторах из-за их низкого сечения поглощения нейтронов, коррозионной стойкости, хороших механических свойств и стойкости к радиационному набуханию. Однако сплав циркония подвержен коррозии. Поскольку количество водорода, образующегося в реакции коррозии, превышает предел растворимости водорода в твердом растворе, происходит выпадение гидридов в оболочке твэла. В случае аварии с потерей теплоносителя (LOCA), температура оболочки может увеличиться до 1100-1200 °C, что приведет к значительному

ускорению реакции коррозии и соответствующей генерации водорода. Во время аварии Фукусима-Дайити большое количество водорода, образующегося через механизм коррозии, привело к взрыву в корпусе реактора, что серьезно ухудшило развитие аварии [9].

Этот вопрос мотивировал исследования в отношении толерантных видов топлива (ATF), которые бы обеспечивали длительную стойкость оболочек твэлов при аварийных условиях. Концепции разработки оболочек ATF, включают в себя обшивку из массивной ферритной легированной стали, объемный карбид кремния (SiC) и др. Хотя эти концепции могут быть более устойчивыми в случае аварий, они потребуют значительных конструктивных изменений в ядерных реакторах. Альтернативный подход заключается в создании оболочки твэла с защитным покрытием, которое также бы обеспечивало коррозионную стойкость и ограничивало реакцию циркония с паром и водой во время нормальной работы, и в условиях аварии [10].

Покрытие TiN может обеспечить химическую инертность до 600 °C на воздухе в зависимости от его стехиометрии [11]. Использование покрытий TiN может улучшить коррозионную стойкость и стойкость к окислению циркониевых сплавов и предотвратить водородное охрупчивание циркониевых сплавов.

1.4.1 Коррозионная стойкость циркониевого сплава с покрытиями TiN, TiAlN

Параметры осаждения покрытия образцов приведены в таблице 1.2. Полученные данные о коррозионном привесе образцов циркониевого сплава ZIRLO® с покрытием и без покрытия, представлены на рис. 1.10. Анализ данных показывает, что образцы с покрытием имели на порядок меньший привес по сравнению с непокрытым ZIRLO®. Данные также показывают, что многослойная структура покрытия также оказывает сильное влияние на коррозионное поведение, таким образом, необходима разработка архитектуры покрытия для обеспечения хорошей защиты от коррозии.

Таблица 1.2 Параметры физического осаждения паров катодной дуги для изготовления монолитного TiN и многослойного покрытия TiN / TiAlN [11].

ID	Coating	# of layers		Deposition rate (μm/min)		Total coating thickness, (μm)
		TiN	TiAlN	TiN	TiAlN	
E21	TiN	1		0.018		8.1
E22	TiN(thin)/Ti _{1-x} Al _x N (thick)	1	1	0.017	0.025	11.1
E23	TiN/Ti _{1-x} Al _x N 2-layer	1	1	0.026	0.026	11.8
E24	TiN/Ti _{1-x} Al _x N 4-layer	2	2	0.020	0.020	8.9
E25	TiN/Ti _{1-x} Al _x N 8-layer	4	4	0.022	0.022	9.8
E26	TiN/Ti _{1-x} Al _x N 16-layer	8	8	0.024	0.024	10.9

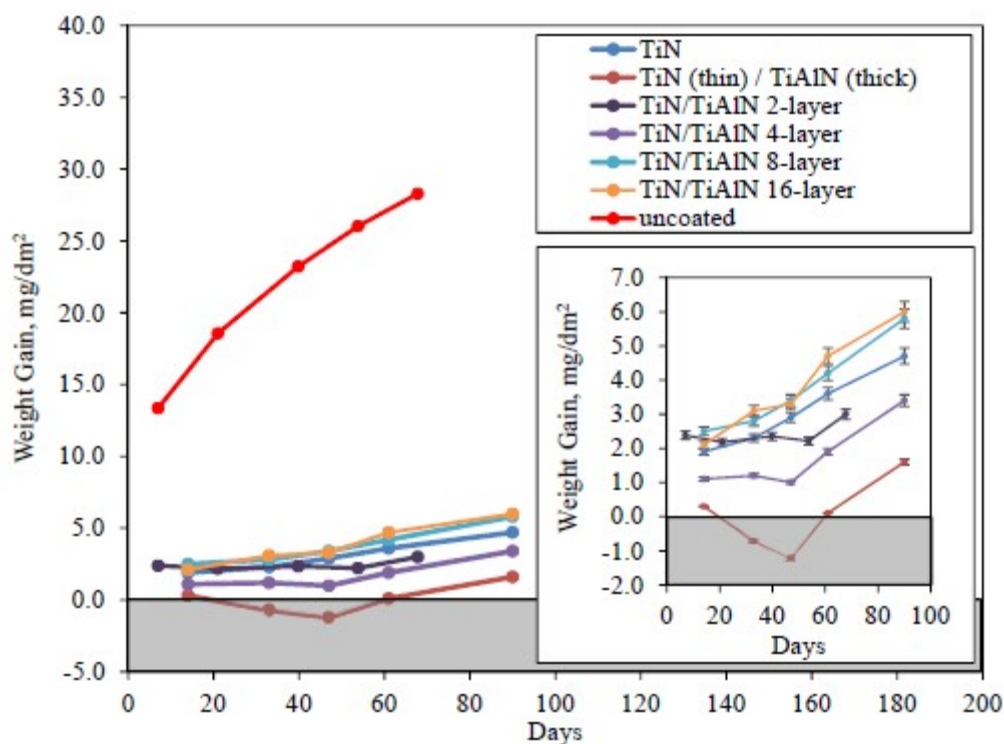


Рисунок 1.5 – Коррозионный привес (мг/дм²) в зависимости от времени экспозиции (дней) для испытываемых образцов. Испытания в автоклаве при 360 °С и давлении 18,7 МПа [11].

1.4.2 Механические свойства нитрида титана

По результатам исследования влияния ионно-плазменных покрытий на механические свойства образцов из отрезков твэльных трубок (рисунок 1.6, 1.7 и 1.8) было показано, что нанесение покрытия TiN увеличивает предел прочности и предел текучести образцов сплава Э110.

Следовательно, нанесение покрытия из нитрида титана на сплав циркония является перспективным способом улучшения срока службы оболочек тепловыделяющих элементов.

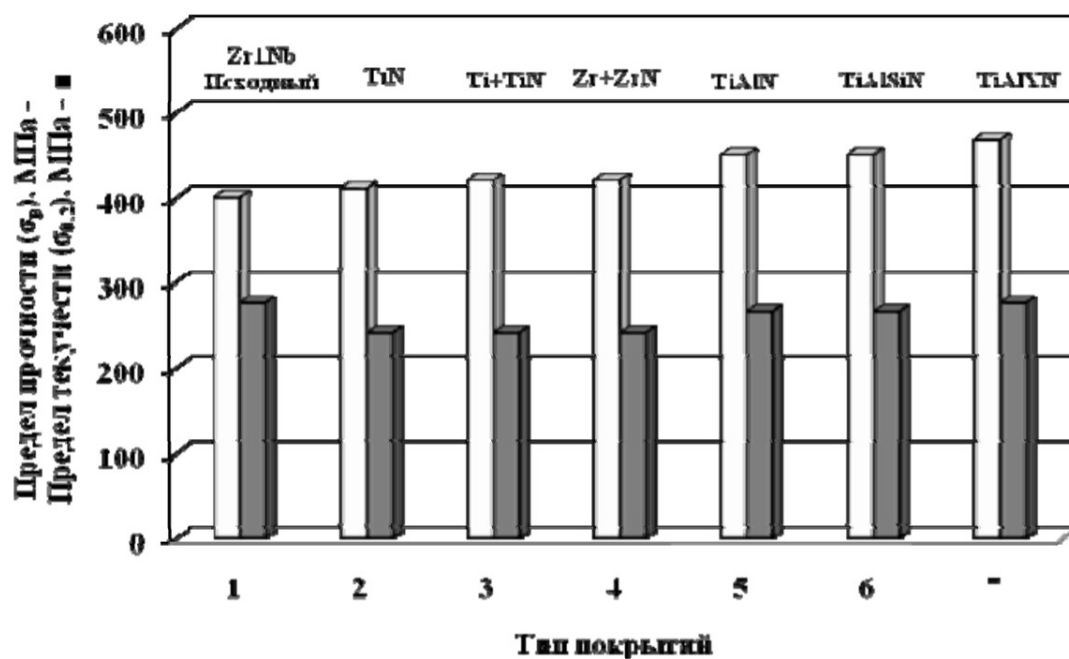


Рисунок 1.6 – Зависимость предела прочности σ_b (□) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (■) от типа покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 – (Ti+TiN)_x; 4 – (Zr+ZrN)_x; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYN. Температура испытаний 20 °C [12].

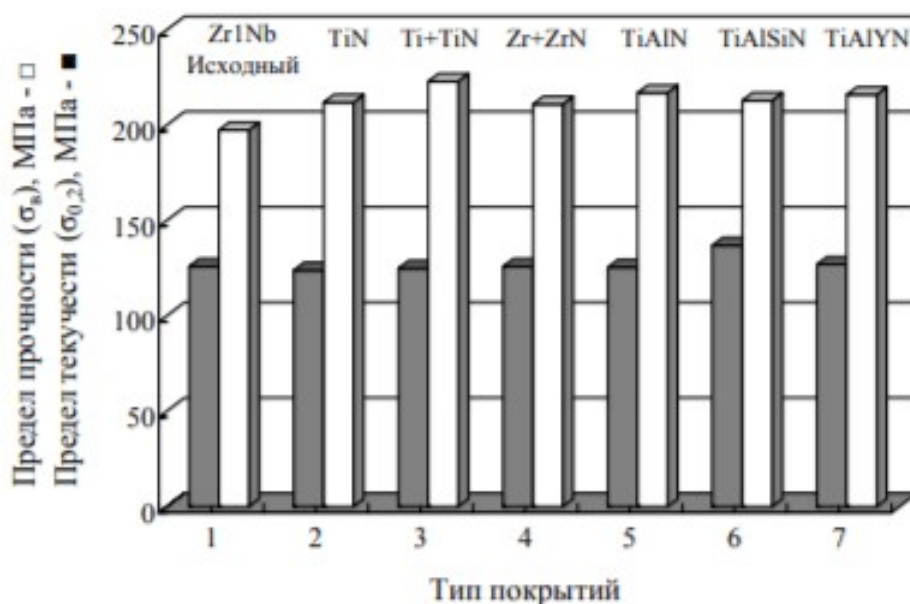


Рисунок 1.7 – Зависимость предела прочности σ_b (□) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (■) от типа покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 – (Ti+TiN)_x; 4 – (Zr+ZrN)_x; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYN. Температура испытаний 350 °C [12].

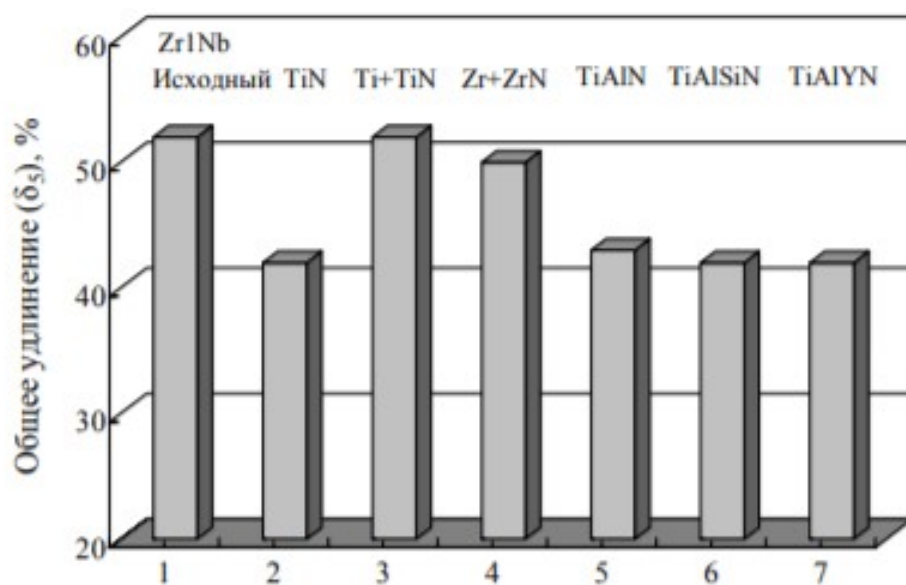


Рисунок 1.8 –Зависимость общего удлинения образцов δ_5 от вида покрытий: 1 – исходный образец; 2 – TiN; 3 – (Ti+TiN)_x; 4 – (Zr+ZrN)_x; 5 – TiAlN; 6 – TiAlSiN; 7 – TiAlYN.

Температура испытаний 350 °C [12].

ГЛАВА 2. Приборы и методы исследования

2.1. Пробоподготовка

Образцы размером 20x20x2 мм были вырезаны из циркониевого сплава Э110 (Zr-1%Nb). Исследуемые образцы шлифовались наждачными бумагами марками P180, P400, P 600, P1200, P 2500 и P4000, для устранения дефектов поверхности. Затем образцы помещались в ультразвуковую ванну, наполненную ацетоном, для очистки поверхности от органических загрязнений.

2.2 Термический отжиг образцов

В таблице 2.1 показаны параметры, которые были использованы при термическом отжиге образцов циркония.

Таблица 2.1 параметры термического отжига образцов

Температура отжига	580°C
Скорость нагрева	6°C/мин
Время отжига	180 мин
Время остывания образцов	0,5°C/мин

На рисунке 2.1 показана кривая температурного отжига образцов. Время нагрева образцов составляет 84,5 минуты. Время отжига исследуемых образцов составило 180 минут.

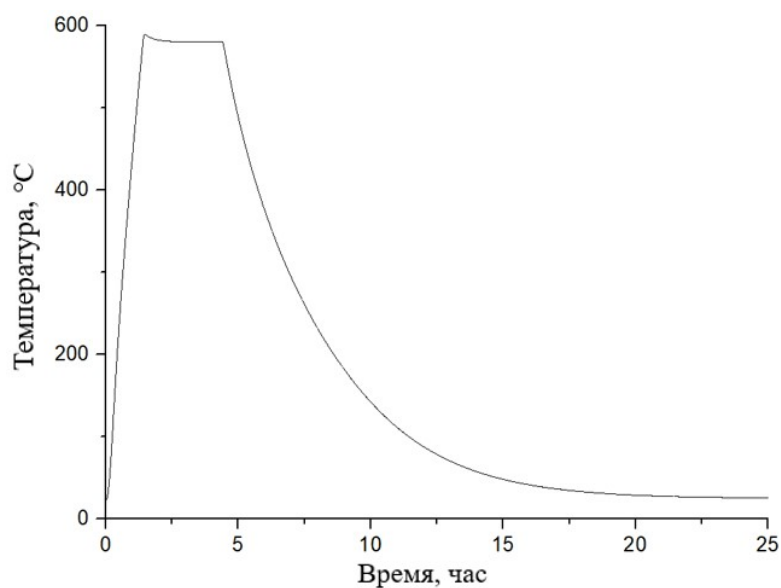


Рисунок 2.1 - Отжиг образцов в вакуумной камере

2.3 Магнетронное напыление TiN

На рисунке 2.2 показана схема экспериментальной установки для осаждения слоя TiN на образцы. Данная установка была разработана в Томском политехническом университете в отделении экспериментальной физики.

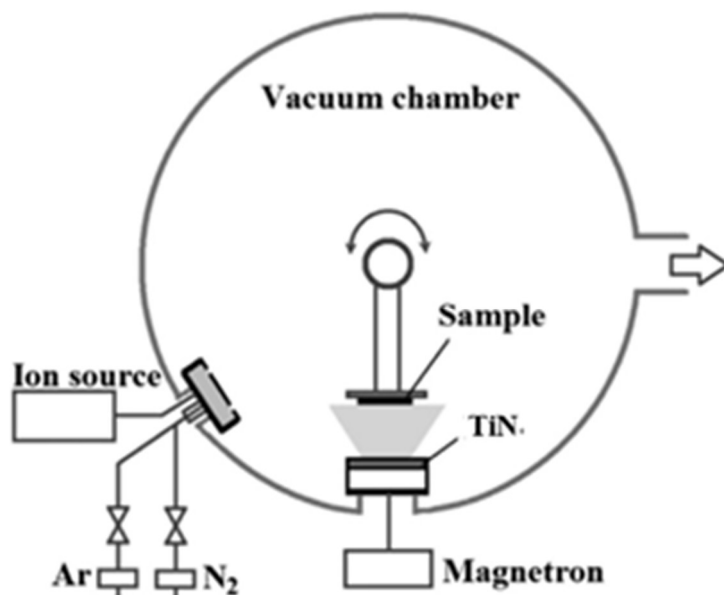


Рис2.2 - Схематическое экспериментальной установки [13].

Таблица 2.2 Параметры напыления покрытий

Параметр	Ti/TiN	
	Ti	TiN
Мощность, кВт	2	2
Напряжение разряда, В	585-590	540-550
Ток разряда, А	2,8	2,9-3,0
Давление в камере, Па	0,1 (Ar)	0,13 Ar (9%) + N ₂ (27%)
Время напыления, мин	4	30

В таблице 2.2 приведены параметры, которые были использованы для нанесения защитного слоя TiN на исследуемые образцы Э110. Образцы фиксировались на держатель и помещались в вакуумную камеру. Остаточное давление в камере составляло $2,5 \times 10^{-3}$ Па. Перед нанесением слоя TiN производилась ионная очистка поверхности образцов с использованием низкоэнергетического источника ионов (Ar).

2.4 Рентгеновский дифрактометр «XRD-7000»

Исследовательский дифрактометр XRD-7000 (Shimadzu, Япония) используется для проведения рентгенофазового анализа, анализа степени кристалличности и многих других задач. Исследования образцов проводились при параметрах съёмки 40 кВ и 30 мА, угол съёмки 5°. На рисунке 2.3 представлена схема установки XRD-7000.

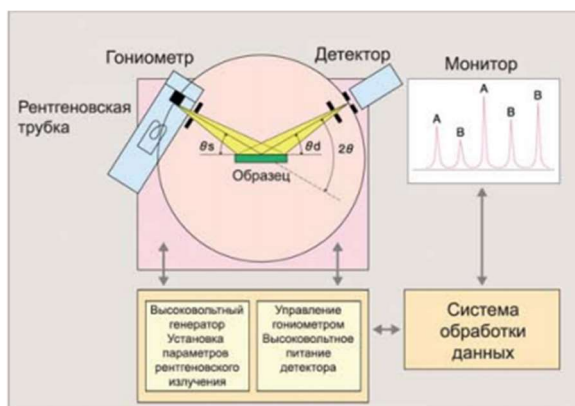


Рисунок 2.3 - Схема установки XRD-7000. [14]

Технические характеристики рентгеновского дифрактометра «XRD-7000» представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Технические характеристики XRD-7000

Позиция	Наименование	Характеристики
Рентгеновская трубка	Материал и тип анода	Cu, Co, Fe, Cr
	Размер фокуса и максимальная мощность	1,0×10 мм; 2 кВт 2,0×12 мм; 2,7 кВт 0,4×12 мм; 2,2 кВт
Рентгеновский генератор	Максимальная мощность	3 кВт
	Максимальные параметры работы	60 кВ – 80 мА
	Защита трубки	Защита от превышения мощности, перегрузок по току и напряжению, перебоев водоснабжения

	Механизм защиты	Механизм блокировки двери; Аварийный стоп
Гониометр	Тип	Вертикальный $\theta - \theta$
	Радиус гониометра	200 мм (XRD -7000S)
	Размеры образца максимальные	Может изменяться от 200 до 275 мм
	Автосамплер	5 позиций (опция)
	Минимальный шаг сканирования	0,00002° (2θ); 0,0001° (θ)
	Режимы работы	Непрерывное сканирование, пошаговое сканирование, позиционирование, осцилляция по оси θ
	Скорость сканирования	0,1° ~50°/мин (θ_s , θ_d); 0,1°~100°/мин (2θ)
Детекторы	Сцинтилляционный детектор	Сцинтилятор NaI, 1 канал.
	Полупроводниковый широкоугольный детектор	1280 каналов; ширина канала 50 мкм.

2.5 Насыщение водородом из газовой среды

Исследуемые образцы насыщались водородом из газовой среды на установке Gas Reaction Controller LPB (США). В экспериментальной установке предусмотрены два вида камер: маленькая, объемом 2 см³ и большая 175 см³.

Температура нагрева образца может варьироваться от 20 до 900 °С, как в автоматическом, так и в ручном режиме. В камерах установлены термопары, которые отслеживают температуру в камере.

Образцы взвешивались и помещались в камеру. Перед насыщением водородом камера вакуумировалась до остаточного давления 10^{-3} Па.

Рабочий объем, в котором находится образец, нагревается до заданной температуры, затем заполняется чистым водородом (99,99%). После абсорбции водорода, камеру вакуумировали и медленно охлаждали.

Насыщение водородом проводилось в ручном режиме. По формуле 2.1 была рассчитана разница между начальным и конечным давлением, при котором образцы могут насытиться до нужной концентрации.

$$\Delta P = \frac{\frac{M_{\text{исход}} \times 0,07}{100} RT}{VM} \quad (2.1)$$

где Δ -разница между начальным давлением и конечным давлением в камере, V -объем камеры (см^3), R -универсальная газовая постоянная, T -температура в камере.

После абсорбции водорода, камеру вакуумировали и медленно охлаждали. Затем образец вынимался из камеры и взвешивался, после чего по формуле 2.2 рассчитывалась концентрация поглощенного водорода.

$$\text{масс \%} = \frac{M_{H_2} - M_{\text{исход}}}{M_{\text{исход}}} \times 100 \quad (2.2)$$

где M_{H_2} – масса образца после насыщения водородом, $M_{\text{исход}}$ – масса образца до насыщения водородом.

2.6 Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий

Для измерения адгезионной прочности покрытий был использован прибор Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000. Параметры, которые могут быть определены: трение; прочность сцепления; акустическая эмиссия изображения и глубина вдавливания.



Рисунок 2.4 - Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий [15]

Чтобы измерить прочность сцепления покрытия, алмазный индентор наносит контролируемую царапину на образец. Нагрузка может быть постоянной или различной. Индентор проходит под поверхностью покрытия под нагрузкой. При критической нагрузке покрытие будет разлагаться. Критическую нагрузку можно подтвердить с помощью датчиков акустической эмиссии, трения, глубины проникновения, силы нагружения головки и оптического микроскопа. Вся информация во время теста будет отображаться на компьютере в режиме реального времени.

2.7 Определение механических характеристик покрытий

Нанотвердомер CSEM Nanohardnes tester NHT-S-AX-000X предназначен для определения с высокой точностью нано и микротвердости, модуля Юнга для практически любых материалов - мягких, твердых, хрупких и эластичных, выполнение тестов для анализа текучести материала, исследование пленки на разрыв и усталость. Когда твердость была измерена с помощью этого прибора, отношение, изменяющейся во времени нагрузки, к глубине проникновения и площади отпечатка индентора (Викерс или Беркович) была проанализирована и изучена кривая нагружения и разгружения. Данные о нагрузке и ее перемещении регистрируются постоянно в течение всего процесса для получения кривой перемещения нагрузки.

ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Организация и планирование работ

В процессе организации реализации конкретных проектов необходимо разумно планировать ситуацию с занятостью участников и рабочее время каждого человека. В следующей таблице 4.1 перечислены люди и имена, вовлеченные в работу.

Таблица 4.1 Участники проекта

№ раб.	Исполнители	Имя
1	Научный руководитель (НР)	Кашкаров Егор Борисович
2	Исполнитель (И)	Чжун Дахуа

При проведении исследований в выпускной работе необходимо строить рабочие группы для того, что достигнуть и выполнить конкретную цель. Для разных видов работ устанавливаются соответствующие должности исполнителей.

Таблица 4.2 Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР	НР – 100%

Определите тему и обсудите фактическое применение, связанное с темой.	НР, И	НР – 80% И – 20%
Разработать экспериментальный план и график	НР, И	НР – 90% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 40% И – 100%
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	НР – 80% И – 20%
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	НР – 80% И – 50%
Горячая обработка металлических материалов и сбор экспериментальных данных	НР, И	НР – 40% И – 100%
Экспериментальный анализ данных	НР, И	НР – 40% И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	НР – 30% И – 100%
Оформление графического материала	НР, И	НР – 40% И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Существует два способа расчета продолжительности этапа работы.

Первый метод — это технология и экономика: этот метод применим к полностью разработанной нормативно-правовой базе для трудоемкости

процесса планирования, что, в свою очередь, обусловлено их высокой воспроизводимостью в стабильной среде. Поскольку подрядчики часто не имеют соответствующих стандартов, мы отказываемся от использования этого метода.

Второй метод - опытно-статистический метод, который может быть реализован двумя способами: 1) аналоговый, 2) экспертный. Аналоговый метод возможен только при наличии устаревшего симулятора в поле зрения исполнителя. В большинстве случаев его можно применять только локально - для отдельных элементов (этап работы). Так что выбирайте экспертный метод для оценки. Экспертные методы пригодны для использования при отсутствии информационных ресурсов, а эксперты в конкретных предметных областях проводят необходимые количественные оценки на основе своего профессионального опыта.

Рассчитайте время, необходимое для каждого шага работы, по следующей формуле:

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{prob} + t_{max}}{6}$$

(4,1)

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{д}$$

(4.2)

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{\text{вн}}$ – коэффициент выполнения работ, $K_{\text{вн}} = 1,2$;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, $K_{\text{д}} = 1,1$

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}} \quad (4,3)$$

где $T_{\text{КД}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{К}}$ – коэффициент календарности, решение по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22 \quad (4, 4)$$

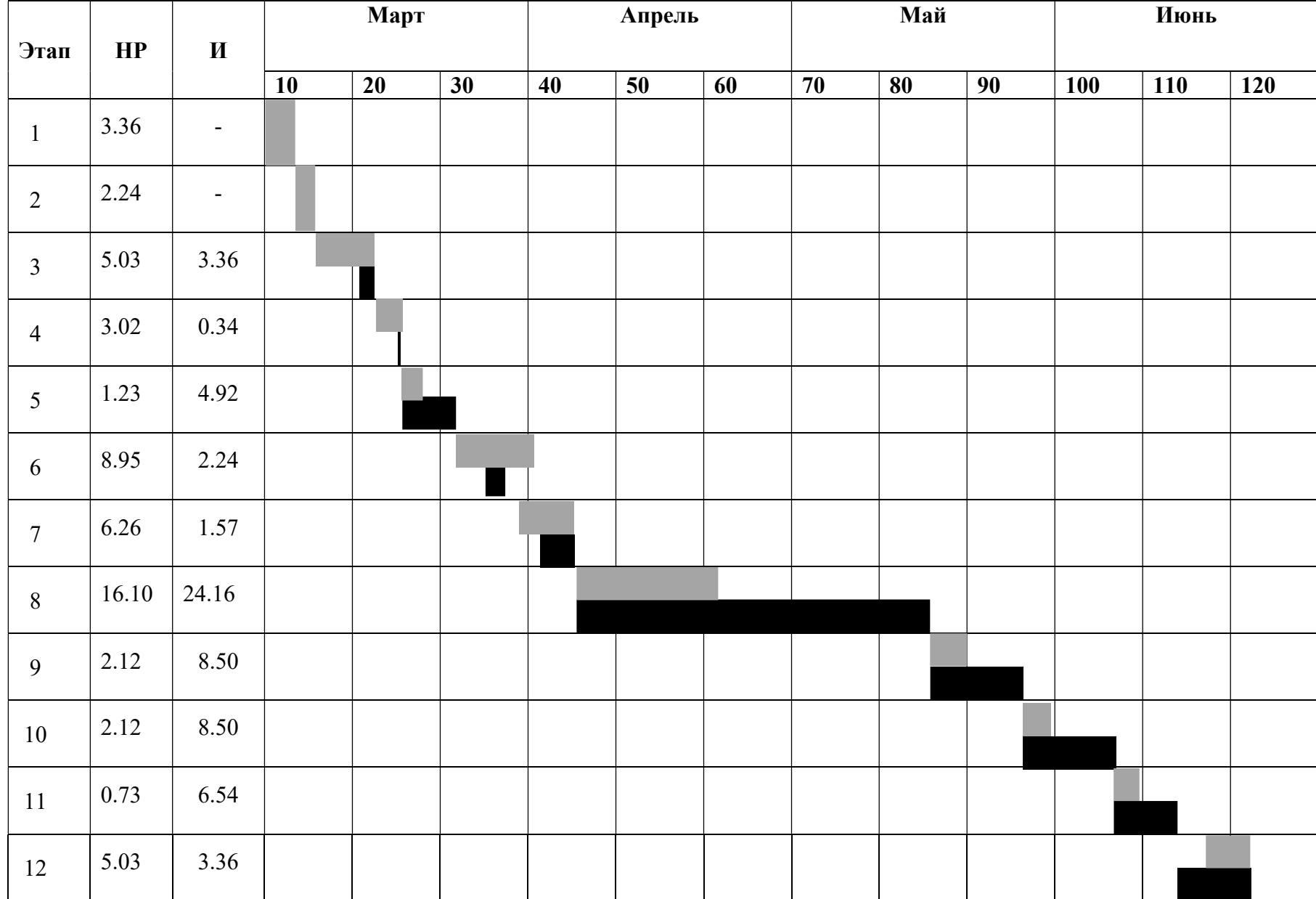
где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни ($T_{\text{КАЛ}} = 365$);

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни по кадровым вопросам. Вопросы применения ст. 111 ТК РФ, ($T_{\text{ВД}} = 52$);

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни по кадровым вопросам. Вопросы применения ст. 112 ТК РФ, ($T_{\text{ПД}} = 14$).

Таблицы 4.3 Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнитель и	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	СД	НР	СД
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка целей и задач	НР	1	5	3	2.75	-	3.36	-
Составление и утверждение ТЗ	НР	1	3	2	1.83	-	2.24	-
Определите тему и обсудите фактическое применение, связанное с темой.	НР, И	7	10	7.5	5.50	1.38	6.71	1.68
Разработать экспериментальный план и график	НР, И	2	4	3	2.48	0.28	3.02	0.34
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	5.5	2.02	5.04	2.46	6.15
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	10	14	10	7.33	1.83	8.95	2.24
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	5	9	7	5.13	3.21	6.26	3.91
Горячая обработка металлических материалов и сбор экспериментальных данных	НР, И	30	42	36	13.20	33.00	16.10	40.26
Экспериментальный анализ данных	НР, И	7	14	9.5	3.48	8.71	4.25	10.62
Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, И	7	14	9.5	2.61	8.71	3.19	10.62
Оформление графического материала	НР, И	5	10	6.5	2.38	5.96	2.91	7.27
Подведение итогов	НР, И	7	10	7.5	4.13	6.88	5.03	8.39
Итого:		85	141	107	52.85	74.98	64.47	91.48



НР – ■; СД – ■

4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Стоимость создания проекта включает в себя все затраты, необходимые для реализации каждой из задач, которые составляют эту разработку. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат: материалы и покупные изделия; заработная плата, социальный налог, расходы на электроэнергию (без освещения), амортизационные отчисления; командировочные расходы, оплата услуг связи.

4.2.1 Расчет затрат на материалы

Во-первых, расходы включают материальные затраты, приобретенные продукты, полуфабрикаты и другие материальные ценности, которые непосредственно потребляются при работе объекта проектирования. Для покупки большого количества предметов, например цены листа сплава Э110, мы используем метод взвешивания. Цена за единицу товара принимается за среднюю рыночную цену. Хотя цена на оптовую торговлю будет намного ниже, чем средняя рыночная цена, мало влияет на небольшое количество протестированных образцов.

Таблицы 4.4 Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Единица измерения	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Сплав Э110 (10*10*0.1 см)	штук	20	2	40
Источник Ti^{44}	см ²	3500	1	3500
Наждчная бумага (А4)	штук	150	8	1200
Бумага (А4)	штук	2	240	480
Защитные перчатки	штук	25	8	200
Итого:				5420

С учетом транспортно-заготовительных расходов сумма составит

$$5420 * 1,05 = 5691 \text{ руб.}$$

4.2.2 Расчет заработной платы

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{дн-т}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = \frac{МО}{\frac{298}{12}} = \frac{МО}{24,83}$$

Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:

$$К_{ПР} = 1,1; К_{доп.ЗП} = 1,188; К_{р} = 1,3.$$

Поэтому необходимо добавить тарифы к базовой зарплате и оценить соответствующий коэффициент. Формула для расчета коэффициента выглядит следующим образом

$$К_{и} = К_{ПР} * К_{доп.ЗП} * К_{р} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699.$$

Таблицы 4.5 Затрата на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1342,09	64.47	1,699	147005,20
И	15 470	617,75	91.48	1,62	91549,07
Итого:					238554,27

4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту.

$$С_{соц.} = С_{зп} * 0,3 = 238554,27 * 0,3 = 71566,28 \text{ руб.}$$

4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Рассчитайте счет за электроэнергию, необходимый для теста. Вам нужно знать местную цену на электроэнергию, мощность устройства и сколько времени использовать, рассчитываемые по формуле:

$$\text{Сэл. об.} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot \text{ЦЭ}$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность кВт;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

ЦЭ – цена на 1 кВт·час; ЦЭ = 5,748 руб./кВт.час (в ТПУ).

Поскольку спектральные данные были записаны, экспериментальное оборудование работало 24 часа, и данные были получены в режиме реального времени с помощью удаленного компьютера. Поскольку экспериментальный метод имеет излучение частиц высокой энергии, он минимизирует контакт между людьми и оборудованием. Эта операция приведет к тому, что рабочее время экспериментального оборудования будет больше рабочего времени человека.

В таких случаях $t_{\text{об}}$ определяется путем прямого учета, особенно если использование соответствующего оборудования ограничено.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} * K_{\text{с}}$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{с}} = 1$ (оборудование малой мощности).

Результаты расчета стоимости электроэнергии, следующие таблице.

Таблице 4.6 Затрата на электроэнергию

№ п/п	Наименование оборудования	Время работы $t_{\text{об}}$ (ч)	Потребляемая Мощность $P_{\text{об}}$ (кВт)	Цена единицы оборудования, $\text{Ц}_\text{э}$ (руб./кВт,ч);	Затраты на электроэнергию, руб.
1.	Gas Reaction Controller LPB	50	0,40	5,748	114,96
2.	Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000	4	0,04		0,92
3.	Компьютер	550	0,22		695,51

5.	XRD-7000	4	3	5,748	68,978
6.	HiCube 80 Eco	50	0,17		48,86
7.	Hy Gen 200	50	0,11		31,61
	Итого	708	3,94		960,84

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В учете затрат учитывается не только счет за электроэнергию оборудования, но и амортизация оборудования. Используется формула.

$$C_{AM} = \frac{H_A * Ц_{ОБ} * t_{pf} * n}{F_d}$$

где H_A – годовая норма амортизации; ($H_A=12,5\%$ по приложению 1)

$Ц_{ОБ}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР.

F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования ($301*24=7224$ ч)

t_{pf} – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, задается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Результаты расчета нормы амортизации в таблице 4.7.

Таблицы 4.7 Амортизационные расходы

№ п/п	Наименование оборудования	Количество (n).	Цена единицы оборудования, руб (Ц _{ОБ})	Общая стоимость оборудования, руб.	Время работы t _{pf} (ч)	Амортизация руб
1.	Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000	1	25000	25000	4	1.730343
2.	XRD-7000	1	8190000	8190000	4	566.8605
3.	HiCube 80 Eco	1	500000	500000	50	432.5858
	Итого					1001.18

4.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1$$

Для нашего примера это

$$C_{\text{проч}} = (5691 + 238554,27 + 71566,28 + 961,3 + 1008,1 + 0) \times 0,1 \\ = 31778,10 \text{ Руб}$$

4.2.7 Общие затраты на исследование

Консолидировать и суммировать расходы по вышеуказанным разделам. Все затраты на этот эксперимент представлены в таблице 4.8 ниже.

Таблицы 4.8 Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	5691
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	238554.27
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	71566.28
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	960.84
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	1001.18
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	31778.10
Итого:		349551.67

4.3 Оценка экономической эффективности исследования

Исследование стоило всего 349551,67 рублей. Этот эксперимент не имеет непосредственного промышленного значения, так как нацелен только на изучение влияния осаждения покрытия TiN на физико-механические свойства и коррозионную стойкость циркониевого сплава Э110, который широко

используются в качестве оболочек тепловыделяющих элементов в активной зоне ядерного реактора. Следовательно, оценка экономической эффективности полученных результатов невозможна.

ГЛАВА 5. Социальная ответственность

Введение

Циркониевые сплавы широко используются в качестве оболочек тепловыделяющих элементов в активной зоне ядерного реактора. Однако в случае аварии с потерей теплоносителя в ядерных реакторах происходит критическое окисление оболочек тепловыделяющих элементов, что приводит к разрушению топливных оболочек и создаёт опасность взрыва водорода.

Одним из способов решения данной проблемы является нанесение стойкого к окислению покрытия на оболочки ядерного топлива.

Таким образом целью данной работы является установить влияние осаждения покрытия TiN на физико-механические свойства и коррозионную стойкость циркониевого сплава Э110. Но этот эксперимент не имеет непосредственного промышленного значения

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.

В этом исследовании результаты эксперимента были показаны на компьютере, а анализ данных также был выполнен на компьютере. Поэтому особенно необходимо обратить внимание на законы о труде, связанные с сидением за компьютером. Следующие законы должны соблюдаться в ходе эксперимента.

1. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

2. ГОСТ Р ИСО 9241-2-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 2. Требования к производственному заданию.

3. ГОСТ Р ИСО 9241-4-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 4. Требования к клавиатуре.

4. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.

5. ГОСТ Р ИСО 9241-1-2007. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDTs). Часть 1. Общее введение.

6. ГОСТ Р ИСО 9241-7-2007. Эргономические требования при выполнении офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 7. Требования к дисплеям при наличии отражений.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Исследование проводилось в России и должно соответствовать трудовому кодексу Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018). В этом эксперименте мы должны обратить внимание на безопасность пожара и безопасность электроэнергии. Мы должны обратить внимание на безопасность при работе в лаборатории. Соответствующие законы: ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).

5.2 Профессиональная социальная безопасность.

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования.

Объектами исследования этого эксперимента является циркониевые сплавы Э110 с покрытием TiN, который не наносит вреда здоровью человека.

5.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

В эксперименте использовался рентгеновский дифрактометр «XRD-7000». Когда защитные меры были небрежными, экспериментатор может подвергаться воздействию радиационной среды.

В эксперименте мы будем использовать вакуумную систему, а вакуумный насос будет издавать много шума при работе, в этом случае исследователи окажутся в шумной обстановке. Когда звук слишком громкий, шум также может повлиять на здоровье человека.

В лаборатории много электрического оборудования, и при проведении экспериментов к электробезопасности следует относиться серьезно.

Микроклимат относится к климатической среде на небольшом пространстве. Микроклимат производственных помещений влияет на здоровье персонала. Микроклимат в лаборатории зависит от температуре, относительной влажности, скорость движения воздуха и т.д.

Таким образом вредными и опасными факторами, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований, являются шум, электробезопасность, радиационная безопасность и микроклимат.

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

1. Шум

. Влияние шума на слуховой анализатор проявляется в ауральных эффектах, которые, главным образом, заключаются в медленно прогрессирующем понижении слуха по типу неврита слухового нерва (кохлеарный неврит). Подвергающиеся шумовому воздействию люди, чаще всего жалуются на головные боли, которые могут иметь разную интенсивность и локализацию, головокружение при перемене положения тела, снижение памяти, повышенную утомляемость, сонливость, нарушения сна, эмоциональную неустойчивость,

снижение аппетита, потливость, боли в области сердца. Шум – это один из самых сильных стрессорных агентов. Влияние шума сказывается на функциях эндокринной и иммунной систем организма, в частности это может проявляться в виде трех главных биологических эффектов: снижение иммунитета к инфекционным болезням; снижение иммунитета, направленного против развития опухолевых процессов; появление благоприятных условий для возникновения и развития аллергических и аутоиммунных процессов. Источником шума при работе на установке является трансформатор, входящий в состав электронно-измерительного блока. Для уменьшения шумового воздействия на человека используются индивидуальные и коллективные средства защиты. В качестве коллективной защиты выступает звукоизоляционный материал, которым покрыта ячейка с помещенным туда блоком. А противозумные наушники и вкладыши могут использоваться, как средства индивидуальной защиты.

Уровень шума в лаборатории должен соответствовать СП 51.13330.2011, ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ и ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ.

2. Электробезопасность

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- вида и величины напряжения и тока;
- его частоты;
- пути прохождения электрического тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- внешних условий среды. Лабораторию, по степени опасности поражения

электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности, согласно ПУЭ. Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим

ТОКОМ;

- защитного заземления;
- защитного зануления;
- защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

3. Радиационная безопасность

Радиация может привести к повреждению клеток человека. При интенсивном облучении, когда погибает некий критический объём клеток, нарушается функционирование соответствующих тканей или органов.

Эталонный стандарт - СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009.

4. Микроклимат.

Для обеспечения достаточного постоянного и равномерного нагревания воздуха в рабочих аудиториях в холодный период года используется отопление. Температуру в помещении следует регулировать с учетом тепловых потоков от оборудования. Стенд нужно устанавливать так, чтобы тепловые потоки от него не были направлены на студентов. С целью поддержания параметров микроклимата в допустимых пределах, а также комфортные условия работы магистрантов применяется 85 кондиционирование воздуха. Кондиционирование воздуха обеспечивает поддержание параметров микроклимата в течение всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ.

Соответствующие стандарты могут относиться к СанПиН 2.2.4.548–96 и СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.

5.3 Экологическая безопасность.

5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.

Объектами исследования этого эксперимента являются циркониевые сплавы Э110 с покрытием TiN. В ходе исследования он не влиял на экологическую среду.

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.

Во время эксперимента нам нужно позволить экспериментальному образцу поглощать водород в газовой среде. На этом этапе мы должны убедиться, что газ в приборе не просачивается в воздух.

При рентгеноструктурным анализу необходимо обратить внимание на то, чтобы источник излучения не загрязнял внешнюю среду.

5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

Охрана окружающей среды - сложная проблема. Мы несем ответственность за не загрязнение окружающей среды во время эксперимента. Хорошая экологическая среда необходима для защиты здоровья каждого.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.

Объект исследований этого эксперимента не вызовут какой-либо чрезвычайной ситуации.

5.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

1. Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6-16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий. Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и

средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности. Помещения разделяются на три класса опасности. Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования с другой стороны. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет >25 В переменного тока и >60 В постоянного тока. Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

- 1) содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
- 2) своевременно проводить техническое обслуживание;
- 3) соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
- 4) проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

- 1) изоляция токоведущих частей;
- 2) малое напряжение в электрических цепях;
- 3) защитное заземление, зануление, защитное отключение;
- 4) применение разделяющих трансформаторов;
- 5) использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
- 6) защитные средства и предохранительные приспособления.

Индивидуальные защитные средства подразделяются на основные и

дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам в установке до 1000 В относятся изолирующие штанги, клещи изолирующие и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами в установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

2. Пожаровзрывобезопасность

Используемое помещение относится к категории Б по пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легковоспламеняемые материалы, также баллоны с газами. Помещение, в котором находится установка, оснащено аварийными выходами, обеспечено средствами пожаротушения, сигнализацией оповещения пожара. План эвакуации представлен на рис.5.1.

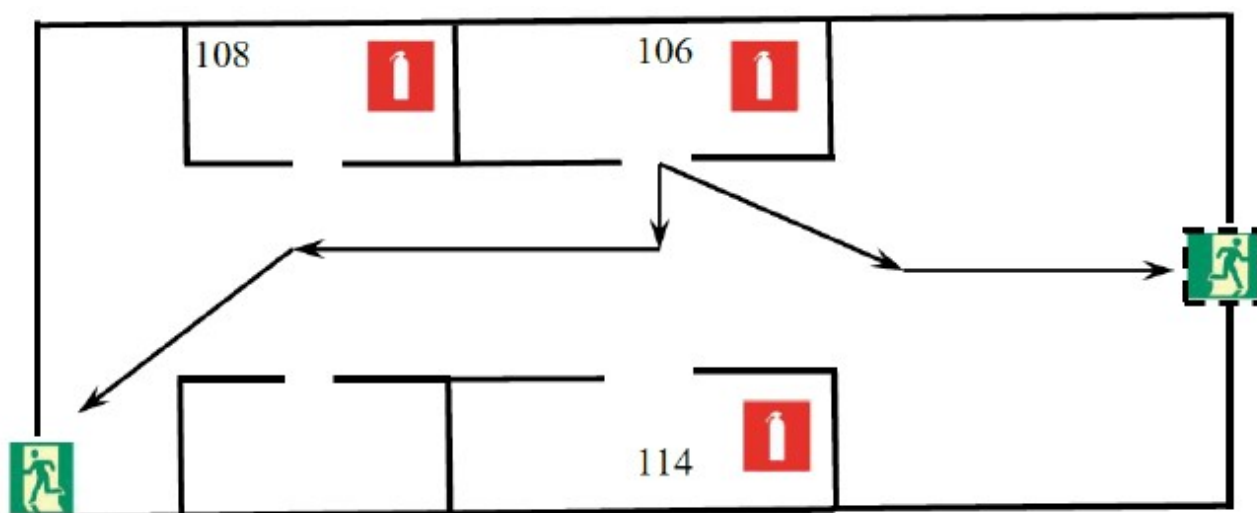


Рисунок 5.1 – План эвакуации рабочих помещений

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации. В лаборатории расположены огнетушители

порошковые ОП-4(з)-АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт). Причинами возникновения пожара могут быть:

- 1) Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
- 2) Курение в неустановленных местах;
- 3) Перегрузка электрических сетей;
- 4) Нарушение правил пожарной безопасности;
- 5) Неправильное хранение возгорающихся веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и азотом. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

- 1) Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

- 2) Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении, находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей.

- 3) Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет.

5.4.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

Проведение всех видов инструктажа должно быть сделано в Книге инструкций с установленной схемой с обязательными подписями лица, которое получило и выполнило инструкцию, указав дату инструкции, имя и номера инструкции для типов за работу, за которую дается инструкция.

Благодаря разработке процедур безопасность жизни может быть максимально увеличена, а потери имущества при авариях могут быть уменьшены.

Заключение

Было установлено влияние осаждения покрытий TiN на коррозионную стойкость и физико-механические свойства поверхности циркониевого сплава Э110. Формирование покрытия TiN толщиной 1,5 мкм обеспечивает снижение наводороживания циркониевого сплава при температурах 350 и 900 °С.

Нанесенные покрытия TiN приводят к снижению водородопроницаемости более чем на 2 порядка, при наводороживании из газовой фазы при температуре 350 °С. Защитные свойства покрытия от проникновения водорода снижаются с ростом температуры наводороживания до 900 °С.

Трибологические характеристики осажденного покрытия TiN улучшаются после наводороживания. Адгезионная прочность покрытий TiN не снижается после 3 циклов нагрева до 900 °С и резкого охлаждения в диапазоне температур 20–900 °С.

Испытания при окислении на воздухе при температуре 1100 °С показали, что коррозионная стойкость циркониевого сплава с покрытием выше примерно в 2 раза в сравнении с непокрытым сплавом. Предварительное наводороживание образцов при температуре 900 °С приводит к значительному снижению коррозионной стойкости сплава с покрытием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] M. Király, K. Kulacsy, Z. Hózer, E. Perez-Feró, T. Novotny. High-temperature steam oxidation kinetics of the E110G cladding alloy // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 475. – P. 27-36.
- [2] H. WANG, Y. WANG, X. WANG, R. WANG, L. WENG, Y. ZHANG. Overview of Influence Factors About Corrosion Resistance of Zirconium Alloys // *Materials Review*. – 2013. – Vol. 1. – P. 022.
- [3] В.М. Ажажа, И.Н. Бутенко, Б.В. Борц и др. Сплав Zr1%Nb для атомной энергетики Украины // *Ядерна фізика та енергетика*. – 2007. – №3 – С. 67- 75.
- [4] B. Straumal, B. Baretzky. Grain boundary phase transitions and their influence on properties of poly-crystals // *Interface Science*. – 2004, – Vol. 12. – P. 147–155.
- [5] B. Ensor, A.M. Lucente, M.J. Frederick, J. Sutliff, A.T. Motta, J. Nucl. Mater. The role of hydrogen in zirconium alloy corrosion // *Journal of Nuclear Materials*. – 2017, – Vol. 496. – P. 301-312.
- [6] R. Kishore. Effect of hydrogen on the creep behavior of Zr–2.5%Nb alloy at 723 K // *Journal of Nuclear Materials*. – 2009. – Vol. 385. – P. 591-594.
- [7] T.W. Oh, Y.S. Kim, S.B. Ahn, K.S. Im, Y.M. Cheong. Effect of hydrogen on creep anisotropy of a Zr-2.5Nb pressure tube // *Trans. Korean Nucl. Soc. Spring Meet., Chuncheon, Korea*. – 2006 – P. 5-6.
- [8] S. Suman, M.K. Khan, M. Pathak, R. Singh. Effects of hydrogen on thermal creep behaviour of Zircaloy fuel cladding // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 498. – P. 20-32.
- [9] D.J. Park, H.G. Kim, Y. Il Jung, J.H. Park, J.H. Yang, Y.H. Koo. Behavior of an improved Zr fuel cladding with oxidation resistant coating under loss-of-coolant accident conditions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 482. – P. 75-82.
- [10] M. Négýési, J. Burda, V. Kloucek, J. Lorincík, J. Sopoušek, J. Kabátová, L. Novotný, S. Linhart, T. Chmela, J. Siegl, V. Vrtílková. Contribution to the study of the pseudobinary Zr1Nb–Oxygen phase diagram by local oxygen measurements of

Zr1Nb fuel cladding after high temperature oxidation // Journal of Nuclear Materials. – 2012. – Vol. 420. – P. 314-319.

[11] E. Alat, A.T. Motta, R.J. Comstock, J.M. Partezana, D.E. Wolfe. Multilayer (TiN, TiAlN) ceramic coatings for nuclear fuel cladding // Journal of Nuclear Materials. – 2016. – Vol. 478. – P. 236-244.

[12] Белоус В.А., Вьюгов П.Н., и др. Механические характеристики твэльных трубок из сплава Zr1Nb после осаждения ионно-плазменных покрытий // Вопросы атомной и науки и техники. – 2013. – №2. – С. 140-143.

[13] V.N. Kudiiarov, E.B. Kashkarov, M.S. Syrtanov, a. M. Lider. Hydrogen sorption by Ni-coated titanium alloy VT1-0 // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 10604-10610.

[14] Рентгеновский дифрактометр XRD-7000: [Электронный ресурс] // SHIMADZU - Режим доступа: <https://www.shimadzu.ru/xrd-7000>

[15] Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий: [Электронный ресурс] // Корпоративный портал ТПУ - Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/centre/cism_fti/tech_base/microscratch.

[16] I. Grimberg, V.N. Zhitomirsky, R.L. Boxman, S. Goldsmith, B.Z. Weiss. Multicomponent Ti–Zr–N and Ti–Nb–N coatings deposited by vacuum arc // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 108. – P. 154-159.

[17] H. Liu, X. Zhang, Y. Jiang, R. Zhou. Microstructure and high temperature oxidation resistance of in-situ synthesized TiN/Ti3Al intermetallic composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding process // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 670. – P. 268-274.

[18] F. Zuzek, J.P. Abriata, A. San-Martin, and F.D. Manchester. The H-Zr (Hydrogen-Zirconium) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1990. – Vol. 11. – P. 385-395.

[19] J. Musil. Hard and superhard nanocomposite coatings // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125. – P. 322-330.

- [20] S-H Leigh, C-K Lin, C.C Berndt. Elastic response of thermal spray deposits under indentation tests // Journal of the American Ceramic Society. – 1997. – Vol. 80. – P. 2093-2099.
- [21] X. Huang, H. Kasem, H.F. Shang, T.M. Shao, I. Etsion. Experimental study of a potential weakening effect in spheres with thin hard coatings // Wear. – 2015. – Vol. 338. – P.54-61.
- [22] J.A Sue, H.H Troue. Friction and wear properties of titanium nitride coating in sliding contact with AISI 01 steel // Wear. – 1990. – Vol. 43. – P.709-720.
- [23] S Wilson, A.T Alpas. TiN coating wear mechanisms in dry sliding contact against high speed steel // Surface and coatings Technology. – 1998. – Vol. 108. – P.369-376.
- [24] I.L. Singer. How third-body processes affect friction and wear // MRS Bulletin. – 1998. – Vol. 23. – P.37-40.